

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0098

WU Kunpeng, LIU Shiyin, GUO Wanqin. Glacier variation and its response to climate change in the Mount Namjagbarwa from 1980 to 2015[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4):1115–1125. [吴坤鹏, 刘时银, 郭万钦. 1980–2015年南迦巴瓦峰地区冰川变化及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4):1115–1125.]

# 1980 – 2015年南迦巴瓦峰地区冰川变化及其对气候变化的响应

吴坤鹏<sup>1,2,3</sup>, 刘时银<sup>1,2</sup>, 郭万钦<sup>3</sup>

(1. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 650091; 2. 云南大学 国际河流与跨境生态安全重点实验室, 云南 昆明 650091; 3. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 基于地形图和 Landsat TM/OLI 遥感影像等数据, 利用目视解译和波段比值法提取 1980 年、2000 年和 2015 年南迦巴瓦峰地区冰川空间分布数据, 分析研究区近 35 年冰川变化, 探讨冰川对气候变化的响应。结果表明: 1980–2015 年, 南迦巴瓦峰地区冰川面积持续减小并呈加速退缩的趋势, 近 35 年共减少了  $(75.23 \pm 4.67) \text{ km}^2$ , 占 1980 年冰川总面积的  $(25.2 \pm 1.6)\%$ , 年平均面积减小率为  $(0.73 \pm 0.05)\%$ 。研究区东南坡冰川面积变化速率大于西北坡, 在不同流域、海拔及朝向上, 冰川变化差异较大。南迦巴瓦峰地区冰川表碛十分发育, 表碛覆盖冰川面积变化率小于裸露冰川, 表碛覆盖对冰川消融具有抑制作用。南迦巴瓦峰地区在气温显著升高的背景下, 虽然降水量有所增加, 但冰川对气温更敏感, 因气温升高引起冰川消融所带来的物质损失超过降水增加对冰川的补给, 导致南迦巴瓦峰地区冰川普遍萎缩。

**关键词:** 南迦巴瓦峰; 冰川变化; 气候响应; 表碛覆盖

**中图分类号:** P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)04-1115-11

## 0 引言

冰川是重要的淡水资源, 是冰冻圈系统重要组成部分<sup>[1-2]</sup>, 对气候变化具有强烈的指示作用<sup>[3]</sup>。IPCC 第五次评估报告指出, 1990–2012 年间, 全球地表和海洋表面平均温度上升了  $0.85 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $0.65 \sim 1.06 \text{ }^\circ\text{C}$ )<sup>[4]</sup>, 在此背景下, 冰川物质亏损, 普遍处于退缩状态<sup>[5-6]</sup>。但由于区域气候与地形的差异, 冰川退缩幅度具有区域差异性<sup>[6-7]</sup>, 甚至有些地区的冰川保持稳定或微弱前进<sup>[8-10]</sup>。冰川对气候变化的不同响应, 影响区域水资源的再分布<sup>[11-12]</sup>, 导致冰川跃动、冰湖溃决洪水等冰川灾害<sup>[13-14]</sup>。因此, 监测冰川的动态变化, 探讨冰川与气候变化的关系, 认识冰川水资源及其引发的冰川灾害具有重要意

义, 可以为区域经济建设、灾害防治、水循环和全球变化研究提供重要的科学支持。

随着遥感卫星的快速进步, 中国西部地区的冰川面积、长度变化及物质平衡研究成果涌现<sup>[10]</sup>; 在地域上以天山<sup>[15]</sup>、喀喇昆仑山<sup>[16]</sup>、祁连山<sup>[17]</sup>、念青唐古拉山<sup>[18-20]</sup>、喜马拉雅山<sup>[21]</sup>冰川变化备受关注, 但喜马拉雅山东段南迦巴瓦峰地区的海洋型冰川变化研究较少。通过实地考察冰川所残存遗迹, 张振拴<sup>[22]</sup>发现南迦巴瓦峰地区末次冰期以来冰川面积逐渐减小, 雪线上升。张文敬<sup>[23]</sup>对南迦巴瓦峰西坡的则隆弄冰川调查发现, 近几十年的时间内, 则隆弄冰川曾发生过两次跃动及多次冰川泥石流, 泥石流堆积体甚至堵塞雅鲁藏布江。为查明南迦巴

收稿日期: 2018-10-07; 修订日期: 2019-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801031; 41761144075); 云南大学人才引进项目(YJRC3201702); 中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室开放基金项目(SKLC-OP-2019-07)资助

作者简介: 吴坤鹏(1990–), 男, 安徽安庆人, 博士后, 2017年在中国科学院西北生态环境资源研究院获博士学位, 从事冰冻圈遥感研究. E-mail: wukunpeng2008@lzb.ac.cn

通信作者: 刘时银, 教授, 从事冰川资源、冰川灾害、冰雪遥感和冰雪水文的理论和应用研究. E-mail: shiyin.liu@ynu.edu.cn.

瓦峰地区冰川活动对西藏墨脱高等级公路工程的影响,张明华等<sup>[24]</sup>利用 Landsat ETM+,以图像统计量为基础,运用遥感数字图像处理技术,对该地区冰川进行了图像光谱信息提取与分析。近年来随着技术手段的提高、遥感数据的丰富,对海洋型冰川研究表明其物质亏损特别显著<sup>[19]</sup>,但南迦巴瓦峰地区尚缺乏长时间序列的冰川编目与冰川变化信息。本文利用地形图和 Landsat 光学遥感影像,获取喜马拉雅山东段南迦巴瓦峰地区冰川空间分布数据,探讨分析该地区近 35 年来冰川变化的规律,为认识南迦巴瓦峰地区在气候变暖的背景下冰川

响应提供相关信息。

## 1 研究区概况

南迦巴瓦峰地处喜马拉雅山东段、念青唐古拉山和横断山交汇地带,海拔 7 782 m,是喜马拉雅山东端的最高峰(图 1)。雅鲁藏布江大拐弯峡谷围绕南迦巴瓦峰山脚,从江面到山顶相对高差一般在 5 000 m 以上,成为世界第一大峡谷。作为前寒武纪古隆起带,南迦巴瓦峰位于岗日嘎布弧形褶皱带、雅鲁藏布江大拐弯弧形板块缝合带西南侧<sup>[25]</sup>。

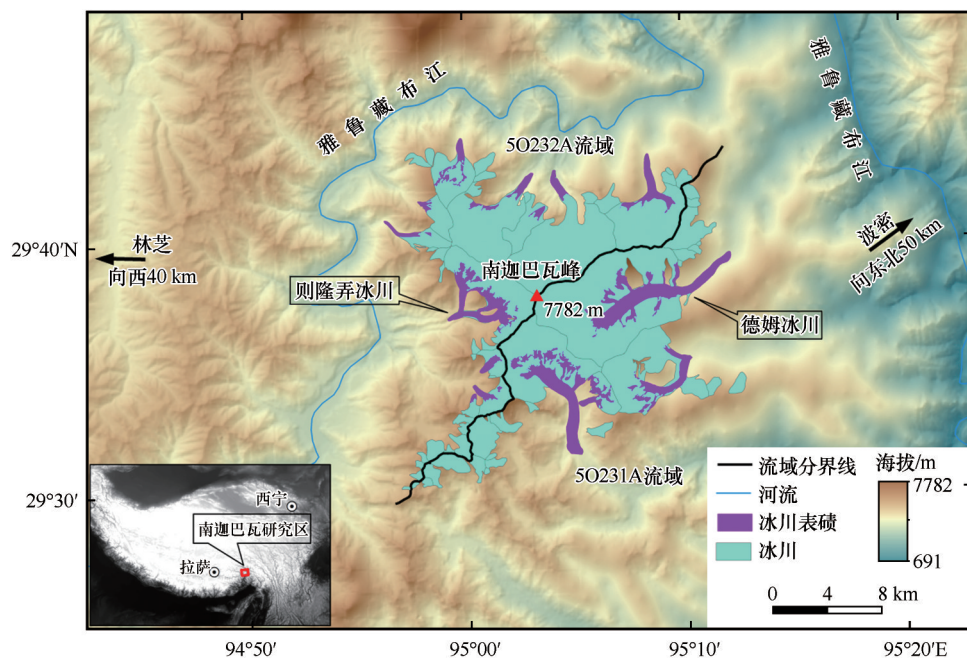


图1 南迦巴瓦峰地区

Fig. 1 Map showing the Mount Namjagbarwa

由于南迦巴瓦峰海拔较高,对南亚季风的阻挡,使得该地区南北坡局地气候有较大差异。研究区南坡主要为山地热带、亚热带气候,而北坡主要为高原温带气候。随着山地海拔的增加,水热分配和组合的变化形成典型的垂直地貌带<sup>[26]</sup>。雪线以上冰雪作用强烈,大量发育季风型海洋型冰川,冰川积累区降水补给丰富,冰川消融强,运动速度快。南迦巴瓦峰南坡雪线相对较高,沟谷长且纵比降小,山谷冰川发育;而西北及北坡地形陡峻,大量冰斗冰川、悬冰川发育。海洋型冰川地质地貌作用强烈,常因气温升高、冰川融水增加,引发崩塌、冰川泥石流等山地灾害<sup>[23]</sup>。

南迦巴瓦峰地区发育大量断裂构造,冰川作用

强烈。中国第一次冰川编目研究表明<sup>[27]</sup>,南迦巴瓦峰地区发育 63 条现代冰川,冰川面积 294.4 km<sup>2</sup>。位于南迦巴瓦峰东坡的德姆冰川为该地区最大的冰川,面积 61.2 km<sup>2</sup>,长 16.4 km<sup>[27]</sup>。位于南迦巴瓦峰西坡的则隆弄冰川,在近几十年的时间内曾发生过两次跃动及多次冰川泥石流<sup>[23]</sup>。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据源

本文利用航空摄影绘制的地形图和 Landsat 遥感影像提取冰川边界,数据获取年份分别为 1980 年、2000 年和 2015 年。我国的基础地形图采用北京 1954 坐标系和黄海 1956 高程系。南迦巴瓦峰地

区地形图包含 2 幅 1:100 000 地形图和 2 幅 1:50 000 地形图。利用航空相片检查第一次冰川编目发现, 第一次冰川编目中部分冰川的边界绘制存在错误。为保证 1980 年冰川边界的正确性, 本文利用研究区范围内所有航空摄影相片对地形图标绘的冰川边界进行检查与修订。

Landsat TM/OLI 遥感影像由美国地质调查局 (USGS) (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) 提供, 经

过系统的辐射校正、几何校正和地形校正。对 Landsat 影像进行质量筛选, 选取了 4 幅 Landsat TM 影像和 5 幅 Landsat OLI 影像, 用于 2000 年和 2015 年冰川边界的提取(表 1)。有研究表明, USGS 提供的 Landsat 遥感影像, 其正射校正精度控制在 1/2 个像元左右<sup>[28]</sup>。因此来源于美国地质调查局的 Landsat 遥感影像可直接用于冰川边界提取。

表 1 遥感影像信息  
Table 1 Information of the remote sensing images

日期(年-月-日)	数据源	ID	分辨率/m	用途
1980-11	地形图	H-46-82	12	1980 年冰川编目
		H-46-83		
		H-46-94-2		
		H-46-95-1		
2000-11-04	Landsat TM	LT51350392000309BJC00	30	2000 年冰川编目
2000-12-22		LT51350392000357BJC00		
2001-07-02		LT51350392001183BJC01		
2001-10-22		LT51350392001295BJC00		
2015-07-09	Landsat OLI	LC81350392015190LGN00	15	2015 年冰川编目
2015-07-25		LC81350392015206LGN00		
2015-11-30		LC81350392015334LGN00		
2016-05-24		LC81350392016145LGN00		
2016-10-31		LC81350392016305LGN00		

本文采用的数字高程模型为 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)。由于 SRTM 属合成孔径雷达干涉测量, 其雷达信号受到一定的影响, 生成的数据存在一定的“空洞”。由国际热带农业中心利用 Reuter 等<sup>[29]</sup>提出的插值方法得到的 SRTM V4.1 版本数据, 对原始的数据空洞有较好的填补。该版本数据空间分辨率 90 m, 在 90% 的置信区间内, 绝对平面误差±20 m, 绝对高程误差±16 m。

利用航空相片和地形图提取 1980 年冰川边界时, 参考中国科学院西北生态环境资源研究院提供的第一次冰川编目数据, 由寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)提供。气象站点数据由中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)提供, 气象格网数据为中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集, 由寒区旱区科学数据中心提供。

2.2 冰川边界提取

对 1980 年冰川矢量边界的提取, 首先将原始地形图按照 300 dpi 在大幅面扫描仪上扫描, 并进行几何纠正, 其纠正的均方根误差小于半个像元,

扫描后的地形图主要用于修正第一次冰川编目冰川制图错误和补充遗漏的冰川。对修正后的冰川边界数字化, 将参考坐标系由北京 1954 坐标系转换到 WGS1984 坐标系中。

基于 Landsat 遥感影像的冰川边界提取, 利用波段比值法(TM3/TM5)确定阈值, 并辅以人工交互式检查, 得到冰川边界栅格图像, 将栅格图像转换为矢量多边形, 以 0.01 km<sup>2</sup>为最小冰川面积来进行编制, 然后参考地形图、Google Earth 对冰川矢量边界进行数据质量检查并人工修订, 并识别表碛覆盖区。通过自动提取山脊线, 利用山脊线分割修订后的冰川矢量多边形, 得到各单条冰川的边界<sup>[30]</sup>。在 ArcGIS 10.5 的支持下, 参考 SRTM 数据, 自动获取冰川面积、海拔、坡度坡向等属性信息; 将不同时期的冰川边界矢量数据进行叠加分析, 得到冰川面积变化信息。

2.3 精度评估

冰川面积误差由偶然误差和系统误差组成<sup>[31]</sup>。由于偶然误差的不确定性, 本文仅考虑由遥感影像分辨率带来的面积误差<sup>[20,32]</sup>, 可通过冰川最边缘的



像元数量,即冰川边缘和冰川内部的裸露岩石区的像元数量计算面积误差。

为进一步提高基于遥感影像的冰川编目误差估算,Guo等<sup>[33]</sup>通过对比第二次冰川编目边界与基于高分辨率遥感数据或野外实地GPS测量获取的冰川边界,发现在裸冰区冰川边界的误差为 $\pm 10$  m,在表碛覆盖区冰川边界的误差为 $\pm 30$  m。Wu等<sup>[18]</sup>通过对比基于地形图的冰川边界与基于4 m分辨率的Corona遥感影像的冰川边界,发现地形图冰川边界有 $\pm 6.8$  m的误差。本文使用的数据源为地形图与Landsat遥感影像,与上述研究的数据源一致,因此本文采用 $\pm 6.8$  m的边界误差评估1980年冰川面积不确定性,采用 $\pm 10$  m和 $\pm 30$  m的边界误差评估2000年和2015年的冰川面积不确定性。

冰川编目的面积不确定性估算公式如下:

$$A = L_c A_c + L_d A_d \quad (1)$$

式中: $A$ 为冰川面积误差; $L_c$ 和 $L_d$ 为洁净冰川区和表碛覆盖区的冰川边界长度; $A_c$ 和 $A_d$ 为洁净冰川区和表碛覆盖区的冰川边界误差。因此,1980年、2000年和2015年南迦巴瓦峰地区冰川编目面积的

不确定性分别为 $2.04 \text{ km}^2$  (0.7%)、 $3.88 \text{ km}^2$  (1.6%)和 $4.20 \text{ km}^2$  (1.9%)。

冰川面积变化的不确定性 $E_{AC}$ 估算公式如下:

$$E_{AC} = \sqrt{(E_{A1})^2 + (E_{A2})^2} \quad (2)$$

式中: $E_{A1}$ 和 $E_{A2}$ 分别为两期冰川面积的不确定性。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 冰川分布现状

研究表明,2015年南迦巴瓦峰地区冰川面积( $219.49 \pm 4.20$ )  $\text{km}^2$ ,冰川数量46条,平均冰川面积为 $4.77 \text{ km}^2$  (表2)。其中面积大于 $10 \text{ km}^2$ 的冰川共有7条,面积( $172.43 \pm 3.30$ )  $\text{km}^2$ ,占总面积的78.6%;面积小于 $1 \text{ km}^2$ 的冰川面积( $8.65 \pm 0.17$ )  $\text{km}^2$ ,占总面积的3.9%,但数量达到25条,占总数量的54.3%。最大冰川为东坡的德姆冰川,面积( $47.64 \pm 0.91$ )  $\text{km}^2$ ;位于西坡的则隆弄冰川面积( $20.35 \pm 0.39$ )  $\text{km}^2$ 。研究区东南坡为5O231A流域,现有冰川17条,面积( $103.12 \pm 2.36$ )  $\text{km}^2$ ,平均规模为 $6.07 \text{ km}^2$ ;而位于研究区西北坡的5O232A流域,平均冰川规模小于5O231A流域,为 $4.01 \text{ km}^2$ ,但有冰川29条,面积( $116.36 \pm 1.84$ )  $\text{km}^2$ 。

表2 南迦巴瓦峰地区不同流域、不同研究时段冰川分布及变化信息

Table 2 Glacier distribution and area changes in the Mount Namjagbarwa from 1980 to 2015

年份	5O231A 流域			5O232A 流域			整个研究区		
	数量/条	面积/ $\text{km}^2$	年变化率/( $\% \cdot \text{a}^{-1}$ )	数量/条	面积/ $\text{km}^2$	年变化率/( $\% \cdot \text{a}^{-1}$ )	数量/条	面积/ $\text{km}^2$	年变化率/( $\% \cdot \text{a}^{-1}$ )
1980年	25	$149.04 \pm 0.94$		38	$145.68 \pm 1.10$		63	$294.72 \pm 2.05$	
2000年	20	$123.37 \pm 2.16$	$-0.86 \pm 0.08$	33	$134.62 \pm 1.71$	$-0.38 \pm 0.07$	53	$257.99 \pm 3.88$	$-0.62 \pm 0.07$
2015年	17	$103.12 \pm 2.36$	$-1.09 \pm 0.17$	29	$116.36 \pm 1.84$	$-0.90 \pm 0.12$	46	$219.48 \pm 4.20$	$-0.99 \pm 0.15$
1980-2015年			$-0.88 \pm 0.05$			$-0.57 \pm 0.04$			$-0.73 \pm 0.05$

由于南迦巴瓦峰的海拔较高,垂直落差较大,以100 m高差为间距对南迦巴瓦峰地区冰川进行海拔统计分析(图2),南迦巴瓦峰地区冰川发育在海拔2 900~7 300 m之间,其中以海拔4 000~6 000 m之间冰川分布最为集中,面积 $161.10 \text{ km}^2$ ,占总面积的73.2%。对研究区不同流域冰川末端海拔、中值海拔及最高海拔统计分析(图3),5O232A流域冰川的平均末端海拔(4 487 m)与5O231A流域冰川的平均末端海拔(4 326 m)近似,但5O232A流域冰川的最小末端海拔低于5O231A流域,最大末端海拔高于5O231A流域。5O232A流域冰川中值海拔的最小值、平均值和最大值,均高于5O231A流域。而最高海拔,5O232A流域冰川的最小值和最大值与

5O231A流域近似,平均值较高于5O231A流域。

从冰川朝向来看(图4),南迦巴瓦峰地区冰川数量以西北朝向最多(10条),但由于西北朝向的冰川规模较小,其总面积为 $9.76 \text{ km}^2$ ,仅占冰川总面积的4.4%。冰川面积以东北朝向最大,其次是北朝向,占冰川总面积的58.9%。西朝向和南朝向的冰川数量均很小,分别为3条和2条,但由于冰川规模差异,西朝向冰川面积仅 $0.39 \text{ km}^2$ ,而南朝向冰川面积达到 $26.41 \text{ km}^2$ 。

南迦巴瓦峰地区冰川表碛十分发育,对遥感影像的目视解译发现,共15条冰川有表碛覆盖,面积达到( $47.59 \pm 2.73$ )  $\text{km}^2$ ,占2015年冰川总面积的21.7%(图1)。表碛覆盖的海拔区间为2 900~

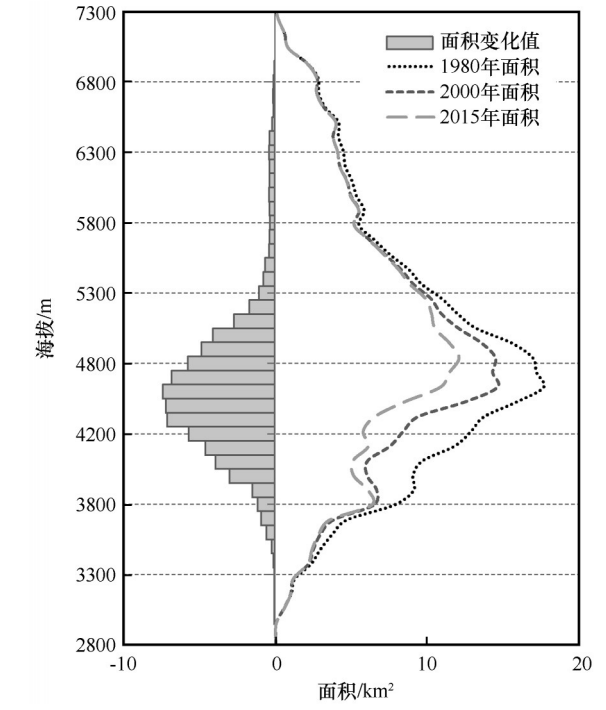


图2 南迦巴瓦峰地区不同海拔的冰川面积分布与变化  
Fig. 2 Glacierized area changing with altitude in the Mount Namjagbarwa in 1980, 2000 and 2015

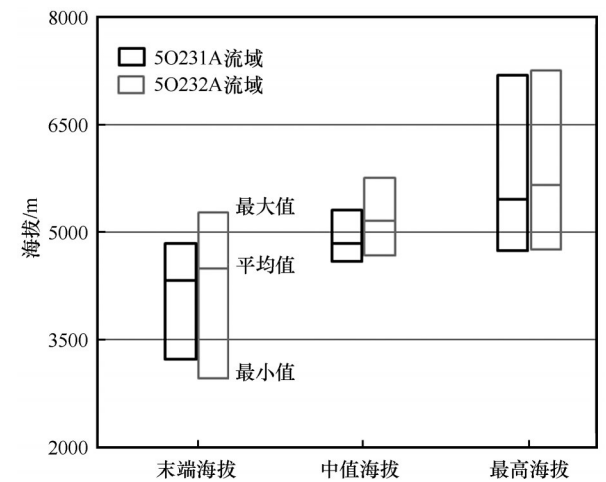


图3 不同流域冰川末端海拔、中值海拔与最高海拔分布  
Fig. 3 Information of the altitude ranges of low, median and height sections of the glaciers in the two subareas: 50231A and 50232A

5 800 m, 海拔 2 900~4 000 m 区间内表碛覆盖的面积大于裸冰面积, 在海拔 4 000 m 左右, 表碛覆盖面积与裸冰面积相当, 海拔 4 000 m 以上, 表碛覆盖面积小于裸冰面积(图 5)。

3.2 冰川变化

通过对比南迦巴瓦峰地区 1980 年和 2015 年冰川编目发现(表 2), 冰川面积呈现减小的趋势, 近 35 年共减少了  $(75.23 \pm 4.67) \text{ km}^2$ , 占 1980 年冰川

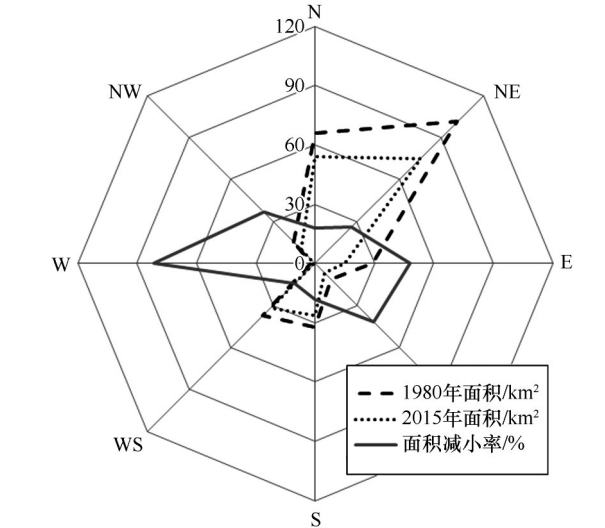


图4 南迦巴瓦峰地区不同朝向的冰川面积分布与变化  
Fig. 4 Rose figures of the glacierized area in 1980 and 2015 and its shrink rate in the Mount Namjagbarwa

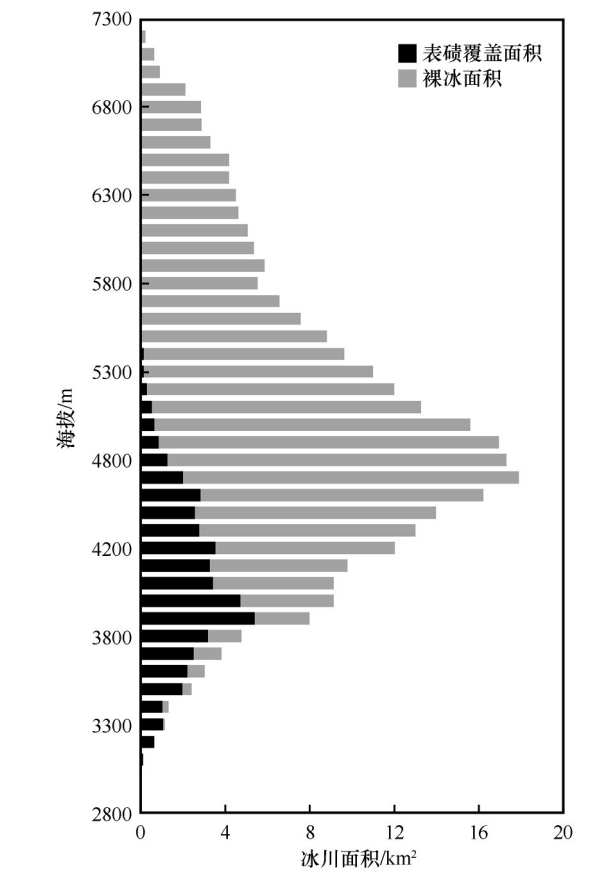


图5 南迦巴瓦峰地区裸冰与表碛覆盖的高程分布  
Fig. 5 Altitude ranges of clean ice and debris-covered ice in the Mount Namjagbarwa

总面积的  $(25.2 \pm 1.6)\%$ , 年平均面积减小率为  $(0.73 \pm 0.05)\%$ , 其中有 17 条冰川完全消失, 面积为  $(9.76 \pm 0.07) \text{ km}^2$ , 剩余 46 条冰川面积减少了  $(65.47 \pm 4.60) \text{ km}^2$ 。对比不同时期的冰川编目, 南

迦巴瓦峰地区冰川面积持续减小并呈加速退缩的趋势。1980–2000年,冰川总面积减少了 $(36.73 \pm 4.39) \text{ km}^2$ ,年减小率为 $(0.62 \pm 0.07)\%$ ;2000–2015年冰川总面积减少了 $(38.50 \pm 5.71) \text{ km}^2$ ,年减小率为 $(0.99 \pm 0.15)\%$ 。

不同流域的冰川面积变化差异较大。1980–2015年,5O231A流域冰川面积减少了 $(45.92 \pm 2.54) \text{ km}^2$ ,年减小率为 $(0.88 \pm 0.05)\%$ ;冰川面积年减小速率呈轻微增加趋势,从1980–2000年的 $(0.86 \pm 0.08)\%$ 增加到2000–2015年的 $(1.09 \pm 0.17)\%$ 。5O232A流域冰川面积变化小于5O231A流域,1980–2015年减少了 $(29.32 \pm 2.14) \text{ km}^2$ ,年减小率为 $(0.57 \pm 0.04)\%$ ;但冰川面积年减小速率

呈显著增加趋势,从2000年之前的 $(0.38 \pm 0.07)\%$ 增加到2000年之后的 $(0.90 \pm 0.12)\%$ 。

从冰川面积变化的空间分布来看(图6),南迦巴瓦峰地区冰川面积绝对变化以大冰川为主,而小冰川的面积相对变化率较高。位于南迦巴瓦主峰四周的冰川,面积均大于 $20 \text{ km}^2$ ,其面积减小的贡献最大,面积绝对变化均 $>1 \text{ km}^2$ ,而相对变化率低于30%。研究区西南部的冰川,由于规模较小,其面积绝对变化较小,相对变化率较大。在气候变暖背景下,小冰川表现出强烈的消融,物质补给不足,而大冰川积累区范围大,能够获得更多的物质补给,因此,如果未来气候持续变暖,小冰川呈加剧退缩趋势。

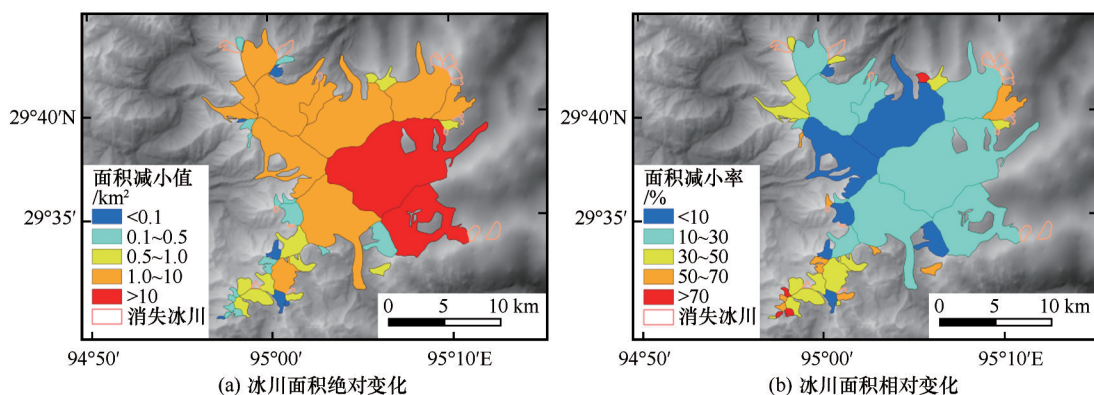


图6 1980–2015年南迦巴瓦峰地区冰川面积绝对变化(a)与相对变化率(b)

Fig. 6 Map showing the glacierized area shrinking (a) and shrinking ratio (b) from 1980 to 2015 in the Mount Namjagbarwa

1980–2015年南迦巴瓦峰地区冰川面积变化在不同海拔上差异显著(图2)。在海拔7000 m以上高海拔区域,冰川面积仅占总面积的0.6%,在近35年间没有发生变化;海拔4700~7000 m之间,冰川面积减小值随着高度的升高而减小;海拔2900~4700 m之间,冰川面积减小值随着高度的升高而增大。海拔4000~5200 m之间冰川面积减小值为 $62.73 \text{ km}^2$ ,占冰川面积总损失的83.5%;在海拔4600~4700 m区间,冰川面积减小了 $7.36 \text{ km}^2$ ,为面积变化最大值。

冰川面积变化在不同朝向上呈现较大差异(图4)。1980年与2015年冰川面积在不同朝向上的分布比重相一致,但由于不同朝向的冰川规模差异较大,西朝向面积减小率最大(81.6%),其次为东、东南朝向,西南朝向面积减小率最小,仅14.7%。

相对于冰雪面,当表碛厚度小于临界厚度时能够加速冰面的消融<sup>[34–36]</sup>,当表碛厚度超过临界厚

度,表碛通过吸收向下传导的热量,从而抑制冰川消融<sup>[10,37]</sup>。因此,不同厚度的表碛覆盖对冰川消融产生不同的影响。对比南迦巴瓦峰地区不同冰川规模下的面积变化率[图7(a)],表碛覆盖冰川规模较大,使得其面积变化率小于裸冰冰川。但对比相同规模下的表碛覆盖冰川与裸冰冰川面积变化率,如小于 $10 \text{ km}^2$ 的冰川,表碛覆盖冰川面积变化率仍小于裸冰冰川。表碛覆盖对冰川消融的另一个重要表现是冰川末端海拔的抬升,对比南迦巴瓦峰地区所有冰川近35年的末端海拔变化[图7(b)],表碛覆盖冰川末端海拔抬升较小,仅有5条冰川因消融导致末端海拔升高,抬升高度均不超过50 m,其余10条表碛覆盖冰川末端海拔均未发生抬升。而裸冰冰川末端海拔平均抬升247 m,最大抬升高度为693 m。可见南迦巴瓦峰地区表碛覆盖对冰川消融具有抑制作用。

在全球升温的背景下,高亚洲山地冰川为总体退缩趋势<sup>[5–6]</sup>,随着遥感技术的快速发展,冰冻圈遥

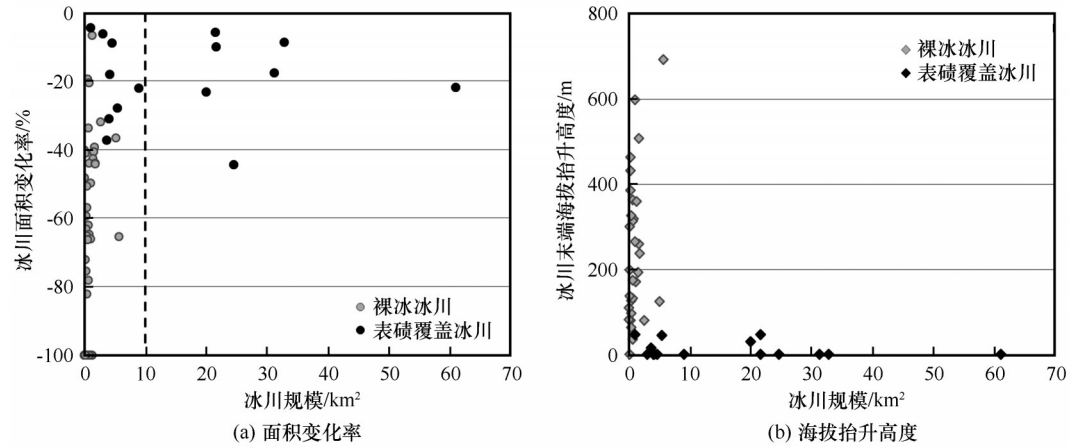


图7 裸露冰川与表碛覆盖冰川的面积变化率(a)与末端海拔抬升高度(b)

Fig. 7 Glacierized area changing rate (a) and glacier terminus rising (b) changing with glacier size for debris-free and debris-covered glaciers from 1980 to 2015 in the Mount Namjagbarwa

感监测范围越来越大、时序越来越长、精度越来越高。本文选取了高亚洲地区不同山区、不同流域的冰川变化情况(表3),与南迦巴瓦峰地区冰川变化对比分析发现,南迦巴瓦峰地区是冰川面积年平均退

缩最强烈的地区之一,相比贡嘎山( $-0.28\% \cdot \text{a}^{-1}$ )、天山( $-0.31\% \cdot \text{a}^{-1}$ )、东帕米尔( $-0.25\% \cdot \text{a}^{-1}$ )、西昆仑( $-0.09\% \cdot \text{a}^{-1}$ )、青藏高原内陆流域( $-0.26\% \cdot \text{a}^{-1}$ )等地,南迦巴瓦峰地区冰川面积减小呈较大的趋势。

表3 高亚洲地区典型山区冰川变化比较

Table 3 Shrinkage information of some typical mountain glaciers in High Mountain Asia

研究区域	面积变化/km <sup>2</sup>	面积变化率/%	退缩速率/%·a <sup>-1</sup>	资料来源	数据源	解译方法	研究时段
贡嘎山	-29.20	-11.30	-0.28	Pan等 <sup>[38]</sup>	地形图、Landsat、Terra ASTER	目视解译、波段比值法	1966 – 2009年
天山	—	-11.50	-0.31	王圣杰等 <sup>[15]</sup>	—	—	1960 – 2010年
珠峰保护区	-501.91	-15.63	-0.56	Nie等 <sup>[39]</sup>	Landsat MSS/TM	归一化雪冰指数	1976 – 2006年
阿尔泰山	-104.61	-36.91	-0.75	姚晓军 <sup>[40]</sup>			1960 – 2009年
东帕米尔	-248.70	-10.80	-0.25	Zhang等 <sup>[32]</sup>			1963 – 2009年
西昆仑	-95.06	-3.37	-0.09	Bao等 <sup>[41]</sup>			1970 – 2010年
祁连山	-417.15	-20.70	-0.47	孙美平 <sup>[17]</sup>	地形图、Landsat	目视解译、波段比值法	1956 – 2005年
青藏高原内陆流域	-766.65	-9.54	-0.26	Wei等 <sup>[42]</sup>			1970 – 2009年
岗日嘎布	-679.51	-24.90	-0.71	Wu等 <sup>[20]</sup>			1980 – 2015年
南迦巴瓦峰地区	-75.23	-25.20	-0.73	本研究			1980 – 2015年

3.3 冰川对气候变化的响应

影响冰川发育的主要气候因子包括气温和降水,温度决定冻结与消融,降水影响物质积累量,两者年际变化对冰川的性质、发育与变化具有决定性影响<sup>[43]</sup>。研究表明,从1955 – 1996年,青藏高原气温的增温速率为 $0.016\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ ,而冬季达到 $0.032\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ ,其中拉萨站从1950年开始气温升高达 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[44]</sup>。Qin等<sup>[45]</sup>利用气象站点数据验证MODIS LST数据发现,青藏高原从海拔3 000 m到4 800 m,升温速率随着海拔的增加而增大,而在更高海拔地区,升温速率趋于稳定或轻微降低。基于

全球降水气候计划(Global Precipitation Climatology Project, GPCP)数据的研究表明,从1979年至2010年,藏东南地区降水呈减少的趋势<sup>[6]</sup>。Li等<sup>[46]</sup>利用中国气象站点数据研究发现,藏东南地区降水呈增加的趋势,其中降水总量和干旱事件发生频率显著增加。因此,气候变化的研究总结不能直接解释南迦巴瓦峰地区冰川变化。

为分析气温和降水对南迦巴瓦峰地区冰川变化的影响,根据研究区空间位置,选取了研究区临近的波密( $29^{\circ}52'\text{ N}$ ,  $95^{\circ}46'\text{ E}$ , 海拔2 736 m)、林芝( $29^{\circ}40'\text{ N}$ ,  $94^{\circ}20'\text{ E}$ , 海拔2 992 m)两个气象站



1980–2012年间夏季近地面气温和降水数据,其中波密气象站位于研究区以东,林芝气象站位于研究区以西,分别作为不同流域冰川变化气候背景参考。波密和林芝4–10月年平均气温变化趋势表明(图8),在冰川消融期呈升温趋势,且升温幅度均超过 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ (通过0.001显著性水平检验),高于全球平均升温率( $0.012\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ , 1951–2012年)<sup>[4]</sup>。位于研究区以东的波密,1980年以来的升温率为 $0.028\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ ,较低于研究区以西的林芝( $0.040\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ )。1980–2000年,研究区以东升温幅度较小( $0.010\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ ),研究区以西升温幅度较

大( $0.028\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ )。2000年之后,气温开始显著上升,平均升温率达 $0.060\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。研究区以东2000年之后的平均气温比2000年之前升高了 $0.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而研究区以西2000年之后的平均气温比2000年之前升高了 $0.69\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。南迦巴瓦峰地区冰川属海洋型冰川,冰川积累主要发生在夏季,两个气象站4–10月降水均呈减少趋势,其中研究区以东变化速率为 $-3.296\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ,研究区以西变化速率为 $-1.677\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。可见,消融期气温显著上升、降水变化不显著的背景下,南迦巴瓦峰地区冰川呈现持续退缩的特征。

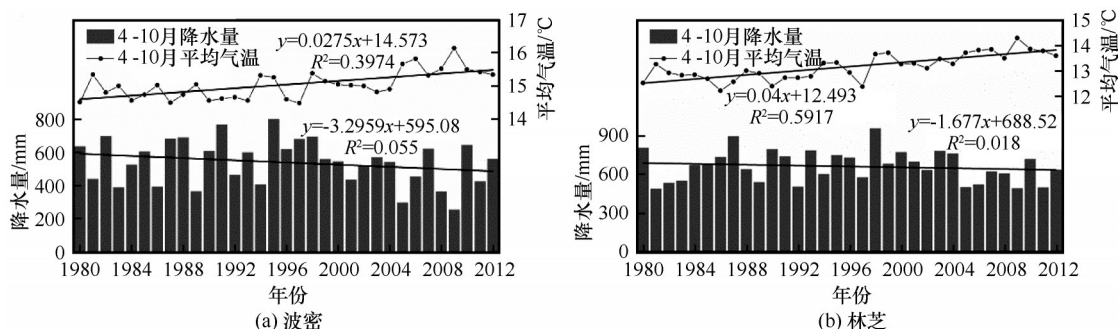


图8 1980–2012年南迦巴瓦峰地区附近气象站4–10月平均气温和降水变化

Fig. 8 Annual variations of average temperature (from April to October) around the Mount Namjagbarwa: Bomi (a) and Nyingchi (b)

为进一步分析南迦巴瓦峰地区冰川退缩的气候变化背景,本文利用近35年中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集(China meteorological Forcing Dataset, CMFD, 1979年1月1日–2012年12月31日)<sup>[47–48]</sup>,选取了1979–2012年4–10月的近地面气温和降水,以分析研究区高海拔地区气候的空间变化特征。对气温、降水数据集逐像元进行显著性检验,其变化趋势置信度均超过90%。为

保证CMFD数据的可靠性,本文选取了中国气象科学数据共享服务网提供的中国近地面气温/降水 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 格点日值数据集。两种气候数据集得到的气候变化趋势,具有较高的一致性,说明CMFD可以作为南迦巴瓦峰地区气候变化背景。从图9可知,1979–2012年4–10月南迦巴瓦峰地区近地面气温显著升高,在冰川作用区,研究区东坡的升温率高于研究区西坡。地面降水在冰川区呈较为一

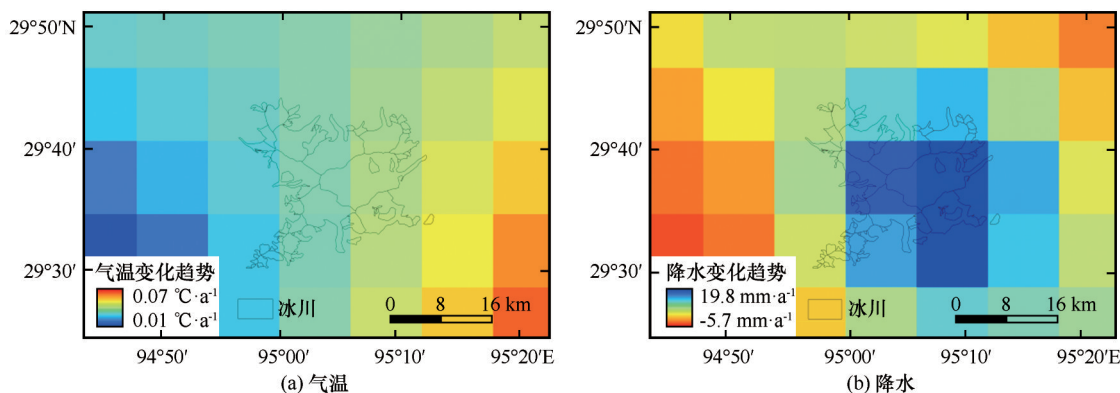


图9 1979–2012年南迦巴瓦峰地区冰川作用区4–10月近地面气温和降水变化趋势

Fig. 9 The changes of temperature (a) and precipitation (b) from April to October around the Mount Namjagbarwa during 1979–2012



致的趋势, 均为显著的增加。根据气温降水变化对冰川平衡线的影响分析, 随着气温的升高, 夏季平均气温升高  $1^{\circ}\text{C}$  带来的冰川平衡线变化需固态降水增加 40%~50% 的补给。南迦巴瓦峰地区在气温显著升高的背景下, 虽然降水量有所增加, 但冰川对气温更加敏感, 因气温升高引起冰川消融所带来的物质损失超过降水增加对冰川的补给, 导致南迦巴瓦峰地区冰川普遍萎缩。从研究区东坡和西坡气候变化与冰川变化的耦合关系, 东坡升温率高于西坡, 降水趋势较为一致, 而东坡冰川面积的年平均减小率  $[(0.88 \pm 0.05)\% \cdot \text{a}^{-1}]$  大于西坡  $[(0.57 \pm 0.04)\% \cdot \text{a}^{-1}]$ , 可见气温升高时南迦巴瓦峰地区冰川面积减小的主要原因。

#### 4 结论

基于地形图和 Landsat TM/OLI 遥感影像等数据, 利用目视解译和波段比值法提取 1980 年、2000 年和 2015 年南迦巴瓦峰地区冰川空间分布数据, 分析研究区近 35 年冰川变化, 探讨冰川对气候变化的响应, 得到主要结论如下:

(1) 南迦巴瓦峰地区共有冰川 46 条, 面积  $(219.49 \pm 4.20) \text{ km}^2$ , 平均冰川规模为  $4.77 \text{ km}^2$ 。南迦巴瓦峰地区冰川发育在海拔 2 900~7 300 m 之间, 其中以海拔 4 000~6 000 m 之间冰川分布最为集中。南迦巴瓦峰地区冰川表碛十分发育, 共 15 条冰川有表碛覆盖, 面积达到  $(47.59 \pm 2.73) \text{ km}^2$ 。

(2) 1980–2015 年南迦巴瓦峰地区冰川面积呈现减小的趋势, 近 35 年共减少了  $(75.23 \pm 4.67) \text{ km}^2$ , 占 1980 年冰川总面积的  $(25.2 \pm 1.6)\%$ , 年平均面积减小率为  $(0.73 \pm 0.05)\%$ 。不同流域、不同海拔及不同朝向的冰川面积变化差异较大。对比不同时期的冰川编目, 从 1980–2015 年, 南迦巴瓦峰地区冰川面积持续减小并呈加速退缩的趋势。

(3) 南迦巴瓦峰地区表碛覆盖冰川面积变化率小于裸冰冰川, 研究区表碛覆盖对冰川消融具有抑制作用。

(4) 南迦巴瓦峰地区在气温显著升高的背景下, 虽然降水量有所增加, 但冰川对气温更加敏感, 因气温升高引起冰川消融所带来的物质损失超过降水增加对冰川的补给, 导致南迦巴瓦峰地区冰川普遍萎缩。从研究区东坡和西坡气候变化与冰川变化的耦合关系得出, 气温升高是南迦巴瓦峰地区冰川面积减小的主要原因。

**致谢:** 国家科技基础性工作专项(2006FY110200)提供了部分冰川编目数据; 中国西部生态与环境科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)提供了第一次冰川编目; 中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)和寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)提供了气象数据; USGS (U.S. Geological Survey, <http://www.usgs.gov>) 数据共享平台提供了 Landsat 影像, 在此一并感谢。

#### 参考文献 (References):

- [1] Kargel J S, Leonard G J, Bishop M P, et al. Global land ice measurements from space[M]. Berlin: Springer, 2014.
- [2] Immerzeel W W, Van Beek L P, Bierkens M F. Climate change will affect the Asian water towers[J]. Science, 2010, 328(5984): 1382–1385.
- [3] Oerlemans J. Quantifying global warming from the retreat of glaciers[J]. Science, 1994, 264(5156): 243–244.
- [4] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]//Stocker T F, Qin D H, Plattner G K. UK and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2013: 1–30.
- [5] Brun F, Berthier E, Wagnon P, et al. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances, 2000–2016[J]. Nat Geosci, 2017, 10: 668–673.
- [6] Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 663–667.
- [7] Zhang M, Wang S, Li Z, et al. Glacier area shrinkage in China and its climatic background during the past half century[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(1): 15–28.
- [8] Rankl M, Kienholz C, Braun M. Glacier changes in the Karakoram region mapped by multitemporal satellite imagery[J]. Cryosphere, 2014, 8: 977–989.
- [9] Gardelle J, Berthier E, Arnaud Y, et al. Region-wide glacier mass balances over the Pamir-Karakoram-Himalaya during 1999–2011[J]. Cryosphere, 2013, 7(6): 1885–1886.
- [10] Scherler D, Bookhagen B, Strecker M R. Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover[J]. Nature Geoscience, 2011, 4(3): 156–159.
- [11] Huss M, Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss[J]. Nature Climate Change, 2018 8: 135–140.
- [12] Kaser G, Großhauser M, Marzeion B. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(47): 20223–20227.
- [13] Benn D I, Bolch T, Hands K, et al. Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming, and implications for outburst flood hazards[J]. Earth-Science Reviews, 2012, 114(1): 156–174.
- [14] Kääb A, Leinss S, Gilbert A, et al. Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability[J]. Nature Geoscience, 2018, 11(2): 114–120.
- [15] Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. Response of glacier area variation to climate change in Chinese Tianshan Mountains in the past 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 38–46. [王圣杰, 张明军, 李忠勤, 等. 近 50

- 年来中国天山冰川面积变化对气候的响应[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 38 – 46]
- [16] Lin H, Li G, Cuo L, et al. A decreasing glacier mass balance gradient from the edge of the Upper Tarim Basin to the Karakoram during 2000 – 2014 [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 6712.
- [17] Sun Meiping, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half century: based on the revised first and second Chinese glacier inventory [J] Acta Geographica Sinica, 2015, 70(9): 1402 – 1414. [孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 近50年来祁连山冰川变化: 基于中国第一、二次冰川编目数据[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1402 – 1414.]
- [18] Wu K, Liu S, Guo W, et al. Glacier change in the western Nyainqentanglha Range, Tibetan Plateau using historical maps and Landsat imagery: 1970 – 2014 [J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(8): 1358 – 1374.
- [19] Wu K, Liu S, Jiang Z, et al. Recent glacier mass balance and area changes in the Kangri Karpo Mountains from DEMs and glacier inventories[J]. The Cryosphere, 2018, 12(1): 103 – 121.
- [20] Wu Kunpeng, Liu Shiyin, Bao Weijia, et al. Remote sensing monitoring of the glacier change in the Gangrigabu Range, southeast Tibetan Plateau from 1980 through 2015 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 24 – 34. [吴坤鹏, 刘时银, 鲍伟佳, 等. 1980 – 2015年青藏高原东南部岗日嘎布山冰川变化的遥感监测[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 24 – 34.]
- [21] Bolch T, Kulkarni A, Kääb A, et al. The state and fate of Himalayan glaciers[J]. Science, 2012, 336(6079): 310 – 314.
- [22] Zhang Zhenshuan. Fluctuations of glaciers on the northwest slope of Mt. Nanjagbarwa since the Last Glaciation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, 10(2): 181 – 188. [张振拴. 南迦巴瓦峰西北坡末次冰期以来的冰川变化[J]. 冰川冻土, 1988, 10(2): 181 – 188.]
- [23] Zhang Wenjing. A surging glacier in the Nanjagbarwa Peak area, Himalayas [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, 5(4): 75 – 76. [张文敬. 南迦巴瓦峰的跃动冰川[J]. 冰川冻土, 1983, 5(4): 75 – 76.]
- [24] Zhang Minghua. Extracting the Temperate Glacier Information in the Mount Namjagbarwa, Tibet Autonomous Region, Based on ETM+ Image [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(2): 226 – 232. [张明华. 基于ETM+影像的西藏南迦巴瓦峰地区海洋性冰川信息提取[J]. 冰川冻土, 2005, 27(2): 226 – 232.]
- [25] Xu Hui, Peng Buzhuo. Comparison of the natural vertical zones between Mt. Namjagbarwa and Mt. Tomur [J]. Journal of Mountain Science, 2002, 20(4): 432 – 437. [徐慧, 彭补拙. 南迦巴瓦峰与托木尔峰山地垂直自然带的比较[J]. 山地学报, 2002, 20(4): 432 – 437.]
- [26] Han Liming, Feng Qianqian. Development characteristics and mechanism of debris flow in Zelongnong Glacier in Mt. Namjagbarwa [J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2018, 4: 58 – 59. [韩立明, 冯倩倩. 南迦巴瓦峰则隆弄冰川泥石流发育特征及成因机制分析[J]. 内蒙古科技与经济, 2018, 4: 58 – 59.]
- [27] Mi Desheng, Xie Zichu, Luo Xiangrui, et al. Glacier Inventory of China, XI, the Ganga Drainage Basin [M]. Xi'an: Cartographic Publishing House, 2002, 9 – 437. [米德生, 谢自楚, 罗祥瑞, 等. 中国冰川编目XI: 恒河水系[M]. 西安: 西安地图出版社, 2002.]
- [28] Guo Wanqin, Liu Shiyin, Xu Junli, et al. Monitoring Recent Surging of the Yulinchuan Glacier on North Slopes of Muztag Range by Remote Sensing [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(4): 765 – 774. [郭万钦, 刘时银, 许君利, 等. 木孜塔格西北坡鱼鳞川冰川跃动遥感监测[J]. 冰川冻土, 2012, 34(4): 765 – 774.]
- [29] Reuter H I, Nelson A, Jarvis A. An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2007, 21(9): 983 – 1008.
- [30] Guo Wanqin, Liu Shiyin, Yu Pengchun, et al. Automatic extraction of ridgelines using on drainage boundaries and aspect difference [J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(6): 210 – 212. [郭万钦, 刘时银, 余蓬春, 等. 利用流域边界和坡向差自动提取山脊线[J]. 测绘科学, 2011, 36(6): 210 – 212.]
- [31] Bolch T, Menounos B, Wheate R. Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985 – 2005 [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(1): 127 – 137.
- [32] Zhang Z, Xu Junli, Liu Shiyin, et al. Glacier changes since the early 1960s, eastern Pamir, China [J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(2): 276 – 291.
- [33] Guo W, Liu S, Xu J, et al. The second Chinese glacier inventory: data, methods and results [J]. Journal of Glaciology, 2015, 61(226): 357 – 372.
- [34] Ding Guangxi, Chen Caiping, Xie Changwei, et al. Study of the ice tongue ablation features of a large glacier in the south slopes of the Mt. Tuomuer in the Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 20 – 29. [丁光熙, 陈彩萍, 谢昌卫, 等. 西天山托木尔峰南麓大型山谷冰川冰舌区消融特征分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 20 – 29.]
- [35] Liu Weigang, Xiao Cunde, Liu Jingshi, et al. Analyzing the ablation rate characteristics of the Rongbuk Glacier on the Mt. Qomolangma, central Himalayas [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4): 814 – 823. [刘伟刚, 效存德, 刘景时, 等. 喜马拉雅山珠穆朗玛峰北坡绒布冰川消融速率特征分析[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 814 – 823.]
- [36] Han Haidong, Wang Jian, Wang Xin, et al. Study of the positive degree-day factor of the ice cliff ablation in debris-covered area of the Koxkar Glacier [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(4): 620 – 627. [韩海东, 王建, 王欣, 等. 科其喀尔冰川表碛区冰崖消融的度日因子研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(4): 620 – 627.]
- [37] Han Haidong, Ding Yongjian, Liu Shiyin. Estimation and analysis of heat balance parameters in the Ablation Season of Debris-Covered Kerkikaer Glacier, Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(1): 88 – 94. [韩海东, 丁永建, 刘时银. 科奇喀尔冰川夏季表碛区热量平衡参数的估算分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 88 – 94.]
- [38] Pan B T, Zhang G L, Wang J, et al. Glacier changes from 1966 – 2009 in the Gongga Mountains, on the south-eastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau and their climatic forcing [J]. The Cryosphere, 2012, 6: 1087 – 1101.
- [39] Nie Y, Zhang Y, Liu L, et al. Glacial change in the vicinity of Mt. Qomolangma (Everest), central high Himalayas since 1976 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20: 667 – 686.
- [40] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Guo Wanqin, et al. Glacier change of Altay Mountain in China from 1960 to 2009: based on the second glacier inventory of China [J]. Journal of Natural Resources, 2012(10): 1734 – 1745. [姚晓军, 刘时银, 郭万钦,

- 等. 50 a 来中国阿尔泰山冰川变化: 基于中国第二次冰川编目成果[J]. 自然资源学报, 2012(10): 1734–1745. ]
- [41] Bao W, Liu S, Wei J, et al. Glacier changes during the past 40 years in the West Kunlun Shan [J]. Journal of Mountain Science, 2015, 12(2): 344–357.
- [42] Wei J, Liu S, Guo W, et al. Surface-area changes of glaciers in the Tibetan Plateau interior area since the 1970s using recent Landsat images and historical maps[J]. Annals of Glaciology, 2014, 55(66): 213–222.
- [43] Xie Zichu, Liu Chaohai. The introduction of glaciology [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2010. [谢自楚, 刘潮海. 冰川学导论[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2010. ]
- [44] Liu X, Chen B. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades [J]. International journal of climatology, 2000, 20(14): 1729–1742.
- [45] Qin J, Yang K, Liang S, et al. The altitudinal dependence of recent rapid warming over the Tibetan Plateau [J]. Climatic Change, 2009, 97(1/2): 321–327.
- [46] Li L, Yang S, Wang Z, et al. Evidence of warming and wetting climate over the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Arctic Antarctic & Alpine Research, 2010, 42(4): 449–457.
- [47] Chen Y, Yang K, He J, et al. Improving land surface temperature modeling for dry land of China [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011, 116(116): 999–1010.
- [48] Yang Kun, He Jie. China meteorological forcing dataset (1979–2018) [DB/OL]. National Tibetan Plateau Data Center, 2019. DOI: 10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249369.file.

## Glacier variation and its response to climate change in the Mount Namjagbarwa from 1980 to 2015

WU Kunpeng<sup>1,2,3</sup>, LIU Shiyin<sup>1,2</sup>, GUO Wanqin<sup>3</sup>

(1. Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. Yunnan Key Laboratory of International Rivers and Transboundary Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650091, China; 3. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Based on topographic maps and Landsat TM/OLI remote sensing images and other data, visual interpretation and band ratio method were used to extract the spatial distribution data of glaciers in the Mount Namjagbarwa in 1980, 2000 and 2015, to analyze the glacier variation in the study area from 1980 to 2015, and to discuss the response of glaciers to climate change. The results show that from 1980 to 2015, the glacierized area in the Mount Namjagbarwa had continued to decrease and showed a trend of accelerated retreat. From 1980 to 2015 the total glacierized area had decreased by  $(75.23 \pm 4.67) \text{ km}^2$ , accounting for  $(25.2 \pm 1.6)\%$  of the total glacierized area in 1980, with the annual mean decreasing rate of  $(0.73 \pm 0.05)\%$ . The glacierized area changing rate on the southeast slopes of the study area was higher than that on the northwest slopes, with a glacierized area variation varying greatly in between different river basins, elevations and orientations. Debris was well developed in the Mount Namjagbarwa, and the change rate of debris covered glacierized area was less than that of non-debris covered glacierized area. Debris cover has an inhibitory effect on glacier ablation. Under the background of significantly rising temperature, although precipitation had increased also, the glacier was still more sensitive to the climate warming. The mass loss caused by the glacier ablation due to rising temperature exceeded the mass accumulation due to precipitation increase, leading to the general shrinking of the glaciers in the mount.

**Key words:** Mount Namjagbarwa; glacier variation; climate response; debris cover

(责任编辑: 王飞腾; 编辑: 周成林)